

**Evento:** XXV Seminário de Iniciação Científica

**ANÁLISE DA CURVA DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND NO DECORRER DO TEMPO<sup>1</sup>  
ANALYZE OF THE HEAT CURVE OF HYDRATION OF THE PORTLAND  
CEMENT OVER TIME**

**Jaíne Bianca Figur<sup>2</sup>, Matheus Henrique Ziel Schünemann<sup>3</sup>, Leticia Rohl  
Saft<sup>4</sup>, Peterson Cleyton Avi<sup>5</sup>, Lucas Fernando Krug<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa realizado no curso Engenharia Civil da UNIJUI

<sup>2</sup> Aluna do curso de Engenharia Civil da UNIJUI.

<sup>3</sup> Aluno do curso de Engenharia Civil da UNIJUI

<sup>4</sup> Aluna do curso de Engenharia Civil da UNIJUI

<sup>5</sup> Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIJUI

<sup>6</sup> Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIJUI

#### INTRODUÇÃO

O renomado pesquisador americano Dr. J. M. Juran definiu qualidade como “adequação ao uso”, na construção civil podemos entender esse conceito quando nossas obras possuem entre outros aspectos, uma vida útil elevada. Um concreto durável é aquele que por vezes possui poucas fissuras, atendendo as propriedades exigidas em norma. Fissuras são patologias inerentes ao concreto, uma das principais causas é o alto calor de hidratação do cimento Portland, material constituinte do mesmo. [2]

O calor de hidratação consiste em uma reação química exotérmica entre o cimento e a água, e possui sua maior intensidade nas primeiras idades, podendo gerar trincas e fissuras nocivas ao concreto, além de possibilitar um futuro ataque do meio externo ao mesmo. [3]

O presente trabalho tem o intuito de observar a curva do calor de hidratação de um dos traços de concreto estudados na tese de Mestrado do pesquisador Lucas Fernando Krug, no decorrer do tempo prevendo seu ponto de máximo, para que assim possa ser realizado um processo de cura e resfriamento, evitando o surgimento de diversas fissuras. A fim de analisar os dados retirados da tese serão utilizados dois métodos estudados na disciplina de Cálculo Numérico Computacional: Ajuste Polinomial e Método de Newton e seus respectivos códigos criados no software MATLAB.

#### METODOLOGIA

O concreto é uma mistura de cimento Portland, com água, agregados e se necessário aditivos, e tende a liberar energia (até 500J/g de cimento), resultado da hidratação dos compostos do aglomerante. A velocidade do desprendimento de calor pode variar de acordo com o teor dos constituintes presentes no material e com a finura do mesmo. [5]

Diante disso, surge a importância da cura adequada e do resfriamento desse concreto, dado que, caso essa temperatura não seja controlada poderá gerar diversas patologias, bem como fissuras e problemas de exsudação proveniente de vasos capilares provocados pelo excesso de calor. Outra alternativa para o problema em questão seria o uso de agregados refrigerados, ou ainda regular a composição química do cimento. [3]

Como citado anteriormente os dados experimentais a serem empregados foram retirados da tese

**Evento:** XXV Seminário de Iniciação Científica

de mestrado Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos do pesquisador e professor Engenheiro Civil Lucas Fernando Krug (2011).

O cimento adotado para o ensaio foi o CP II F- 32 (caracterizado pela adição de fíler), frequentemente utilizado pelas concreteiras comerciais e em obras em geral. O traço do concreto referencial foi 1:2:3 (cimento: areia :brita) variando apenas em níveis distintos de resistências em função da relação água/aglomerante, o fator escolhido para esse relatório foi o a/c: 0,46 (quantidade de massa de água medida em relação à massa de cimento), em virtude do mesmo ter apresentado o melhor desempenho. A realização do ensaio da evolução da temperatura semi-adiabática (sem que haja troca de calor com o ambiente) contou com o software PicoLog que captou os dados emitidos pelos termopares localizados (mergulhados) na metade do volume de cada amostra, essas temperaturas eram informadas a cada 1 minuto. Cada amostra de material era colocada em um recipiente cilíndrico de alumínio com 350 ml de volume ainda em seu estado fresco. A figura 1 representa a situação comentada. Mais detalhes sobre o experimento podem ser encontrados em Krug(2011).



Figura 1 - Equipamento de calorimetria Semi-adiabática

Para compreender e analisar o comportamento do concreto no decorrer do tempo, se fez o uso dos métodos numéricos e a ferramenta MATLAB, juntamente com a programação criada durante as aulas de Cálculo Numérico Computacional.

O Ajuste polinomial consiste em encontrar uma curva que se molde a uma série de pontos formados pelas variáveis dependentes e independentes, nesse procedimento é possível efetuar extrapolações, permitindo assim estimar valores futuros. O Ajuste de curvas polinomial é baseado no Método de Mínimos Quadrados, onde para determinar um polinômio de grau  $m$ , representado

por  $P_m(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$ , devemos resolver o seguinte sistema. [1]

**Evento:** XXV Seminário de Iniciação Científica

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \dots & \sum x_i^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \sum x_i^{n+2} & \dots & \sum x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i \cdot y_i \\ \sum x_i^2 \cdot y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^n \cdot y_i \end{bmatrix}$$

Quando trabalhado com dados experimentais, devido principalmente ao erro experimental que possa existir nos mesmos, a curva pode ter sua qualidade de representação prejudicada. Tal nível pode ser quantificado através do coeficiente de determinação, habitualmente representado por  $R^2$ , e conhecido através da resolução das equações abaixo. Esse valor poderá variar de 0 a 1, e representa em percentual a qualidade do ajuste, portanto melhor será o ajuste quanto maior for o  $R^2$ . [1]

$$R^2 = 1 - \left( \frac{SQE}{SQT} \right)$$

$$SQE = \sum (Y - \hat{Y})^2$$

Soma dos quadrados dos erros

$$SQT = \sum (Y - \bar{Y})^2$$

Soma do quadrado das diferenças em relação à média

Neste trabalho o Ajuste polinomial gerou as curvas a partir dos dados experimentais retirados da tese.

O outro procedimento que contribuiu para o trabalho foi o Método de Newton, utilizado para determinar raízes de equações quando não é possível encontrar por Método Analítico. Neste caso foi empregado para determinar as raízes da derivada do polinômio encontrado pelo ajuste polinomial em um determinado intervalo, com o intuito de obter o ponto de máxima temperatura. O método resume-se geometricamente a substituir um pequeno arco da curva  $y=f(x)$  por uma reta tangente, traçada a partir de um ponto, sendo esse um dos extremos do intervalo. Ele trabalha com

$$X_1 = X_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad .[1]$$

a ideia de derivada e a raiz é encontrada por meio da formula

#### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o ajuste de curvas foram utilizados nove pontos experimentais, que podem ser observados na tabela 1. Após analisado o comportamento dos dados, e realizado o ajuste com um polinômio de grau 6 (equação 1), foi gerado o gráfico (Figura 2), com  $R^2 = 0,9874$ , ou seja, 98,74% de qualidade para ser utilizado no interior dos dados conhecidos, não é recomendável utilizar o polinômio encontrado para extrapolar dados pois com o passar do tempo vai tender ao infinito positivo.

$$F = 3,7 \cdot 10^{-17} x^6 - 3,2 \cdot 10^{-13} x^5 + 1,0 \cdot 10^{-9} x^4 - 1,5 \cdot 10^{-6} x^3 + 9,3 \cdot 10^{-4} x^2 - 6,7 \cdot 10^{-2} x + 22,01 \quad (1)$$

**Evento:** XXV Seminário de Iniciação Científica

t (min)	T (°C)
0	22,04
350	25,57
700	29,82
1050	27,41
1400	24,95
1750	23,55
2100	22,72
2450	22,16
2770	21,79

TABELA 1 - Temperatura do concreto traço 1/4,6

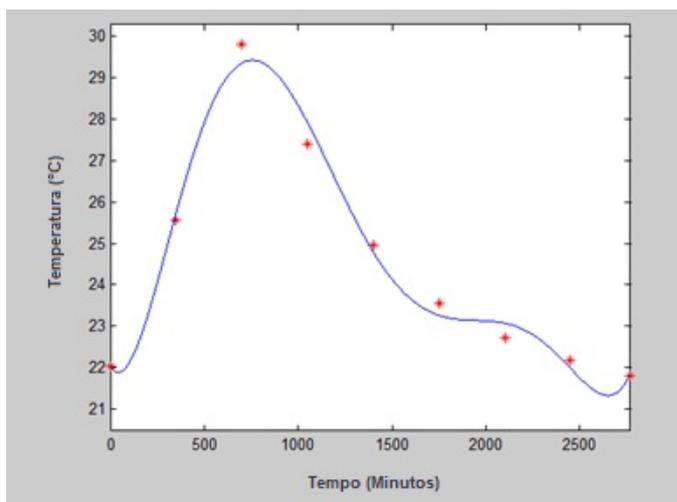


Figura 2 - Gráfico da curva do Traço 1/4,6 determinada por Ajuste polinomial

Posteriormente encontrado o polinômio, derivamos o mesmo (equação 2) para usá-lo no método de Newton. A derivação do polinômio se fez necessária uma vez que para encontrarmos os máximos e mínimos de uma função devemos analisar onde a taxa de variação é nula, ou seja, onde os valores de  $x$  fazem  $F'(x)=0$ . Esses valores são as raízes da derivada, que neste caso foram encontradas pelo método de Newton.

$$F' = 2,2 \cdot 10^{-16}x^5 - 1,6 \cdot 10^{-12}x^4 + 4,3 \cdot 10^{-9}x^3 - 4,7 \cdot 10^{-6}x^2 + 1,8 \cdot 10^{-3}x - 6,7 \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

O ponto de máxima temperatura ocorreu no intervalo de [400 a 800] minutos após iniciado a mistura, e seu valor foi 29.43°C no tempo de aproximadamente 752 minutos e 20 segundos. Com esses dados é possível antecipar o processo de cura do concreto, para que este não perca sua água constituinte e conseqüentemente não fissure.

#### CONCLUSÃO

Ao término deste trabalho verificou-se a eficácia dos métodos numéricos utilizados para encontrar as curvas representado os dados experimentais e possibilitando a tomada de decisões, do mesmo

**Evento:** XXV Seminário de Iniciação Científica

modo que o método de Newton permitiu encontrar a máxima temperatura e o exato tempo em que ela ocorreu, diferentemente do método analítico que não seria possível nessa situação. Os procedimentos numéricos podem em diversas vezes auxiliar em situações reais quando pretende-se quantificar dados e fazer análises baseadas no estudo de suas curvas. Formulou-se a ideia de que mesmo sendo um mecanismo fundamentado na aproximação, o método numérico em sua maioria forneceu resultados muito próximos dos exatos, a curva encontrada por Ajuste polinomial teve um  $R^2$  de 98,74 %, considerado de boa qualidade, ou seja, um erro muito pequeno, que em parte, pode ter sido gerado pelo experimental dos dados. Em síntese, conclui-se que os métodos utilizados contemplaram o objetivo do trabalho, e auxiliaram para análise dos pontos de temperatura máxima de calor de hidratação e seu respectivo tempo, permitindo antecipar um processo de cura e/ou um pré-resfriamento para a diminuição das patologias e fissuras do concreto.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] BARROSO, L. C. ET al. Cálculo numérico com aplicações. 2 ed. São Paulo: HarbraLtda, 1987.
- [2] FALCÃO BAUER L. A. Materiais de construção. 5.ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 488p.
- [3] FUSCO, Pericles Brasiliense. Tecnologia do concreto estrutural. 1. Ed. São Paulo: PINILtda, 2008.
- [4] KRUG, Lucas Fernando. Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos. São Leopoldo, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos.
- [5] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.